

## ვერცხლისწყლის მგრძობიარე სენსორის კონსტრუქციაში მყარი დიელექტრიკული ფუძემშრის პოლიმერული ფუძემშრით ჩანაცვლება

თენგიზ ხაჩიძე<sup>1,2</sup>, ნიკოლოზ ხაჩიძე<sup>1</sup>

<sup>1</sup>სსიპ ინსტიტუტი „ოპტიკა“; <sup>2</sup>საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი  
ნაშრომი დაფინანსდა შოთა რუსთაველის ეროვნული სამეცნიერო ფონდის მიერ. გრანტის  
ნომერი FR-24-4324

### ანოტაცია

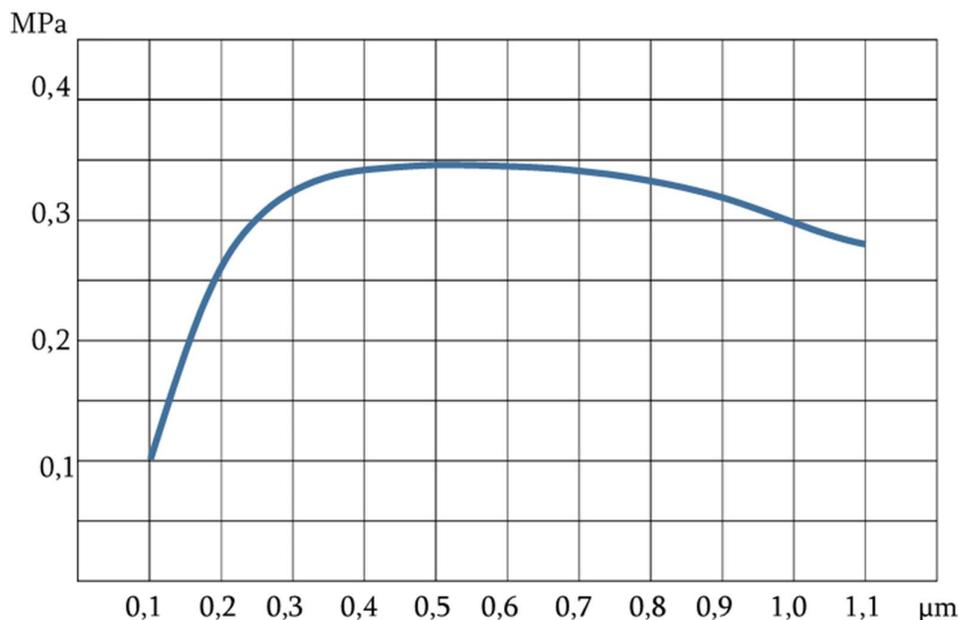
ნაშრომში მოყვანილია კვლევები, რომლებიც დაკავშირებულია ვერცხლისწყლის მგრძობიარე სენსორის შექმნასთან. მოცემულია ავტორების მიერ შემუშავებული სენსორის დროითი და ტემპერატურული მდგრადობის გაზრდის შესაძლებლობა ტექნოლოგიური და კონსტრუქციული დახვეწით. კერძოდ, მგრძობიარე ფენასა და ფუძემშრეს შორის ადჰეზიის გაზრდას მყარი ფუძემშრის პოლიმერულით ჩანაცვლებით. ტექნოლოგიურად ფუძემშრეზე კი არ დაეფინოს სენსორული ფენა არამედ პირიქით სენსორულ ფენაზე მოხდეს პოლიიმიდის ფუძემშრის ფორმირება. ჩატარდა ტექნოლოგიური პროცესები და გამოკვლევები იქნა მიღებული სტრუქტურები. პირველადი შედეგებით ვერცხლისწყლის მგრძობიარე ოქროს თხელი ფენის ადჰეზიური სიმტკიცე პოლიმერულ ფუძემშრესთან დაახლოებით ერთი თანრიგით გაიზარდა იმვე ფენის ადჰეზიურ სიმტკიცეზე მყარ დიელექტრიკულ საფენთან შედარებით. ეს იმის ვარაუდის საფუძველს გვაძლევს, რომ აღნიშნული კონსტრუქციით და ტექნოლოგიით დამზადებული სენსორი სტაბილური და გამძლე იქნება დროში და სითბური დატვირთვების მიმართ.

**საკვანძო სიტყვები:** ვერცხლისწყალი, სენსორი, პოლიმერი, ფუძემშრე.

ელექტრონული კომპონენტები ისეთები როგორცაა დიოდები, ტრანზისტორები, ინტეგრალური სქემები, სენსორები და ა.შ. ძირითადად ფორმირდება მყარ ფუძემშრეზე (სუბსტრატზე). ფუძემშრეებად გამოიყენება ისეთი მასალები როგორცაა სილიციუმი, საფირონი, სიტალი და ა.შ. ჩვენს მიერ შემუშავებული ვერცხლისწყლის მგრძობიარე სენსორის კონსტრუქციაც წარმოადგენდა მყარ დიელექტრიკულ ფუძემშრეზე

ფორმირებულ ვერცხლისწყლის მგრძობიარე თხელ ფენას [1]. მგრძობიარე ფენად შერჩეული იქნა ოქროს თხელი ფირი. რაც განპირობებული იყო იმით, რომ ოქრო ქიმიურად მედეგია ყველა ელემენტის მიმართ, სამაგიეროდ ოქრო ურთიერთქმედებს (არა ქიმიურად) ვერცხლისწყალთან (ფაქტიურად იხსნება ვერცხლისწყალში ამალგამის წარმოქმნით) და შესაბამისად იცვლის ელექტროფიზიკურ პარამეტრებს. ფაქტიურად ის მგრძობიარეა მხოლოდ ვერცხლისწყლის მიმართ. აღნიშნული დებულება კი მაღალი გარჩევის და მაღალი მგრძობიარობის ვერცხლისწყლის სენსორის შექმნის საშუალებას იძლევა [2]. ამ მხრივ ოქროს თხელი ფენა საუკეთესოა ვერცხლისწყლისადმი მგრძობიარე სენსორის შესაქმნელად. თუმცა სენსორის შემუშავების პროცესში გარკვეულ წინააღმდეგობას წავაწყდით. რაც პირველ რიგში იმაში გამოიხატებოდა, რომ სენსორი არ იყო სტაბილური დროში და თბური დატვირთვების პირობებში ის ნელნელა მწყობრიდან გამოდიოდა. ჩატარდა კვლევები სენსორის არასტაბილურობის მიზეზების დასადგენად. ერთერთ ძირითად მიზეზად დადგინდა ოქროს თხელი ფენის ცუდი ადჰეზია მყარ დიელექტრიკულ საფენთან. ამის გამოსასწორებლად ჩატარდა კვლევები სხვადასხვა მყარ დიელექტრიკულ საფენზე ოქროს თხელი ფირების სხვადასხვა მეთოდებით ფორმირებისას. აღნიშნული მგრძობიარე ფენის ფორმირებისათვის გამოვცადეთ სხვადასხვა მასალის მყარი დიელექტრიკული ფუძემოტი და დაფენის სხვადასხვა მეთოდები და რეჟიმები ადგეზიური სიმტკიცე იყო ძალიან დაბალი (ზუსტი გაზომვა ვერ ხერხდებოდა) და ვერ უზრუნველყოფდა სენსორული ფენის სტაბილურ მუშაობას.

გაკეთდა ანალიზი რომელმაც საუკეთესო ვარიანტად დაგვისახა საფირონზე ვაკუუმური მაგნეტრონული გაფრქვევით მიღებული ოქროს თხელი ფირი. ჩატარდა კვლევები ადჰეზიური სიმტკიცის ოქროს თხელი ფენის სისქეზე დამოკიდებულების შესასწავლად. ნახ.1-ზე მოცემულია ვაკუუმური მეთოდებით დაფენილი ოქროს თხელი ფირის ფუძემოტესთან ადჰეზიის დამოკიდებულება ფირის სისქეზე. თუმცა მიღებული ადჰეზიური სიმტკიცე მაინც არ იყო სათანადო (არ აღემატებოდა  $0,35 \cdot 10^6 \text{ნ/მ}^2$ ). მცირე მექანიკური ზემოქმედებითაც სენსორი გამოდიოდა მწყობრიდან.



ნახ.1

ლიტერატურული მონაცემებითაც ოქროს თხელი ფირების ფორმირებისას მყარ დიელექტრიკულ საფენზე მაღალი ადჰეზიის მიღება შეუძლებელია. ერთადერთი გამოსავალი ამ დროს შუალედური (გარდამავალი) ისეთი მეტალური ფენის ფორმირებაა რომელსაც მაღალი ადჰეზია ექნება, როგორც მყარ დიელექტრიკულ საფენთან, ასევე ოქროს თხელ ფენასთან. ამ მიმართულებით კვლევის გაგრძელებას აზრი არ ქონდა, რადგან ნებისმიერი შუალედური მეტალური ფენა ელექტრულად დაშუნტავდა ოქროს თხელ ფენას და ვერცლისწყლისადმი სენსორული თვისებები დაიკარგებოდა.

კვლევების გაგრძელებამ მიგვიყვანა იმ აზრამდე, რომ მყარ ფუძეშრეზე კი არ დაგვეფინა სენსორული ფირი არამედ პირიქით სენსორულ ფენაზე ფორმირებულიყო დიელექტრიკული ფუძეშრე (სუბსტრატი). ამ ტექნოლოგიის განხორციელების შედარებით იოლ შესაძლებლობას იძლევიან პოლიმერული მასალები. ამ მასალების თხევადი ლაქების შემდგომი პოლიმერიზაციით შესაძლებელია მყარი სუბსტრატების მიღება. მოცემული კვლევის ძირითადი ამოცანა იყო შეგვერჩია პოლიმერული მასალა რომელიც დააყმაყოფილებდა იმ მოთხოვნებს, რომლებიც აუცილებელი იქნებოდა სენსორის შემდგომი გამართული მუშაობისათვის. კერძოდ: პოლიმერიზაციის შემდეგ იქნებოდა მდგრადი სხვადასხვა აგრესიული გარემოს მიმართ (მჟავები, ტუტეები და სხვა), ექნებოდა მაღალი ტემპერატურული მედეგობა (არა ნაკლებ +400°C) და კარგი ადჰეზია სენსორის მგრძნობიარე ფენასთან. თეორიული კვლევებით და ჩვენი გამოცდილებით მიზანშეწონილად მივიჩნიეთ პოლიმერულ მასალად შეგვერჩია პოლიიმიდი. კერძოდ პოლიიმიდის ლაქი AD-9103 და მისი იმიდიზაციით შეგვექმნა პოლიმერული ფუძეშრე.

წარმოდგენილი კვლევის ძირითადი მიზანი იყო პოლიიმიდის ლაქის იმიდიზაციისა და შრობის სხვადასხვა რეჟიმებით და სხვადასხვა სისქეებით მიგველო თხელფიროვან

სენსორულ ფენასთან მაქსიმალურად მაღალი ადჰეზიური სიმტკიცე. ჩატარებული კვლევებით ეს მიღწეული იქნა იმიდიზაციისა და შრობის - რამდენიმე ეტაპით. პოლიიმიდის დაფენა ხდებოდა ცენტრიფუგის საშუალებით. სასურველი სისქე მიიღებოდა ცენტრიფუგის ბრუნვის სიჩქარის რეგულირებით. პოლიიმიდის დაფენამდე ხორციელდებოდა სტრუქტურის შეთბობა 100°C ტემპერატურამდე. რაც უზრუნველყოფდა დასაფენი ზედაპირიდან ტენისა და შემთხვევით მოხვედრილი აქროლადი ნივთიერებების მოცილებას.

პროცესი ჩატარებული იქნა როგორც სუფთა ნიკელის და ალუმინის ფოლგაზე ასევე, ნიკელის ფოლგაზე ვაკუუმური მეთოდით ფორმირებულ ოქროს თხელ ფენაზე. ტექნოლოგია დეტალურად შემდეგი ეტაპებისაგან შედგება:

### **1. ფოლგის დამაგრება ტიტანის ჩარჩოზე.**

ჩვენს მიერ გამოყენებული (ნიკელის და ალუმინის) ფოლგის სისქე შეადგენს 10 მკმ-ს, ამიტომ იგი არ წარმოადგენს მყარ სტრუქტურას და განიცდის დეფორმაციას, რაც ტექნოლოგიური პროცესების ჩატარებას შეუძლებელს ხდის. ამის თავიდან ასაცილებლად საჭიროა ფოლგის წინასწარი დამაგრება. დამაგრება ხორციელდება მისი გაჭიმვით ტიტანის ჩარჩოში, რომლის ზომებიცაა 50 x 65 მმ. ტიტანის არჩევა ჩარჩოს მასალად განაპირობა მისმა ქიმიურმა ინერტულობამ ტექნოლოგიურ პროცესებში გამოყენებული ქიმიკატებისადმი და სიხისტემ.

ფოლგის დამაგრება ტიტანის ჩარჩოზე თერმოკომპრესიული მეთოდის გამოყენებით ხორციელდება. ამ დროს ხდება წერტილოვანი შედუღება ჩარჩოს მთელი პერიმეტრის გასწვრივ. შედუღების წერტილებს შორის დაშორებაა 5 მმ.

### **2. ფოლგის ზედაპირის მომზადება.**

ფოლგის ზედაპირის მომზადება მის გაწმენდას გულისხმობს ცხიმოვანი და სხვა ტიპის გაჭუჭყიანებისგან. ამ პროცესის დროს უნდა გამოირიცხოს თვითონ მასალის დაზიანება ან მოწამვლა. ორგანულ გამხსნელებში გამოხარშვა კარგ შედეგს იძლევა. კერძოდ ჩვენს მიერ გამოყენებული იყო ტოლუოლის ხსნარი. ტოლუოლში 5 წთ დუღილის შემდეგ ფოლგის ზედაპირის ორივე მხარე გამდინარე დეიონიზირებული წყლით ირეცხება. გარეცხვის შემდეგ ცენტრიფუგის საშუალებით ხდება გაშრობა. ფოლგის ორივე ზედაპირის გაშრობის შემდეგ იგი მზადაა შემდგომი ტექნოლოგიური პროცესების ჩასატარებლად.

### **3. პოლიიმიდის საფენი ფენის ფორმირება.**

ეს ტექნოლოგიური პროცესი ნიკელის, ალუმინის ფოლგის და ნიკელის ფოლგაზე წინასწარ ფორმირებული ოქროს თხელი ფენის ზედაპირზე 1-12 მკმ სისქის პოლიიმიდის ფენის ფორმირებას ითვალისწინებს. საწყის მასალად გამოყენებული იყო პოლიიმიდის ლაქი AD-9103.

გამომდინარე დასაფენი ფენის სისქიდან და მასალის თავისებურებებით დაფენისთვის ყველაზე მოსახერხებელ და ზუსტ მეთოდად მიღებული იქნა ცენტრიფუგის მეთოდი. დაფენისთვის გამოყენებული იყო ფოტოლითოგრაფიის დანადგარის ცენტრიფუგა.

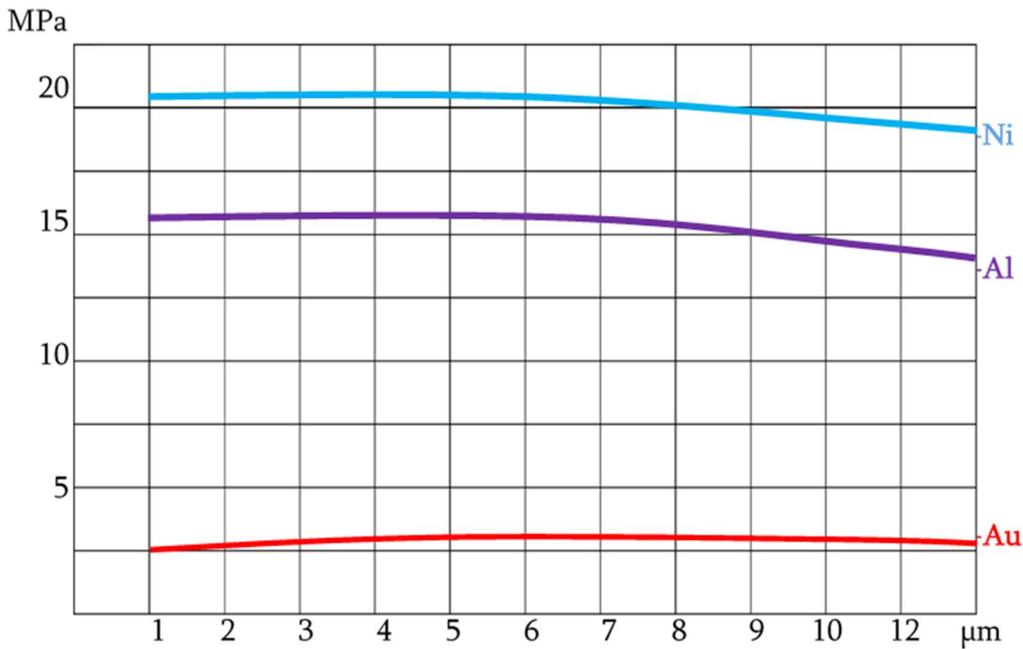
გამომდინარე დასაფენი ფენის სისქიდან და მასალის დინამიკური სიბლანტიდან ცენტრიფუგის ბრუნვის სიჩქარე შეადგენდა 1500-2000 ბრ/წთ.

პოლიიმიდის ლაქის თხელი ფენის მიღების შემდეგ მისი გაშრობა წარმოებს – პოლიმერიზაცია 80°C ტემპერატურაზე 30 წთ-ის განმავლობაში. პოლიმერიზაციის მერე ხდება მიღებული სტრუქტურის გამოწვა 350°C ტემპერატურაზე 5 წთ-ის განმავლობაში.

#### 4. ნიკელის ფოლგის მოხსნა მოწამვლით

იმ სტრუქტურაში სადაც ოქროს თხელი ფენა დაფენილი იყო ნიკელზე საჭირო იყო ნიკელის ფოლგის მოხსნა. რაც განხორციელდა მისი ქიმიური მოწამვლით. ნიკელის ფოლგის მოწამვლა წარმოებს სამქლორიანი რკინის (FeCl<sub>3</sub>) ხსნარით სიმკვრივით 1,5 კგ/ლ, ტემპერატურაზე 50-70°C მოწამვლის დრო შეადგენს 10-20 წთ-ს. საბოლოოდ დარჩა მხოლოდ სტრუქტურა პოლიიმიდი ოქროს თხელი ფირი.

ზემოთ აღწერილი ტექნოლოგიით მიღებული იქნა სამი თხელფიროვანი სტრუქტურა ნიკელი-პოლიიმიდი, ალუმინი-პოლიიმიდი და ოქრო-პოლიიმიდი. პოლიიმიდის ფენის სხვადასხვა სისქეებისათვის. გაიზომა თითოეული მათგანისათვის ადჰეზიური სიმტკიცე და მისი დამოკიდებულება პოლიიმიდის ფენის სისქეზე მიღებული შედეგებით აგებული იქნა გრაფიკები (ნახ.2).



ნახ.2

გაზომვებმა გვიჩვენა, რომ აღნიშნული ტექნოლოგიით მიღებული სტრუქტურის ადგეზიურმა სიმტკიცემ სენსორულ თხელ ფენასა (ოქროს თხელი ფირი) და ფორმირებულ პოლიმერულ ფუძემრეს შორის შეადგენდა დაახლოებით 3.106ნ/მ<sup>2</sup>, რაც გაცილებით აღემატება (დაახლოებით ერთი თანრიგით მაღალია) მყარ ფუძემრეზე ვაკუუმურად დაფენილი იგივე მასალის ადგეზიურ სიმტკიცეს და სრულად აყმაყოფილებს სენსორის სტაბილური მუშაობისათვის საჭირო მოთხოვნებს. როგორც

გრაფიკებიდან ჩანს ამ მაჩვენებლებით ის მიუახლოვდა იგივე ტექნოლოგიის პირობებში დაფენილი ისეთი ლითონებს ადჰეზიურ მაჩვენებლებს როგორცაა ალუმინი და ნიკელი.

საბოლოოდ შეიძლება დავასკვნათ, რომ თუ ოქროს თხელ ფენაზე შევქმნით პოლიიმიდის ფუძემდებ მივიღებთ ადჰეზიის მკვეთრ ზრდას (დაახლოებით ერთი თანრიგით). შესაბამისად მიიღება სტრუქტურა რომელიც უფრო მდგრადი იქნება როგორც მექანიკურად ასევე თერმულად და შესაძლებლობას მოგვცემს შევქნათ ვერცლისწყლის ორთლისადმი მგრძობიარე სტაბილური სენსორი.

### ლიტერატურა

1. Бутурлин А.И, Хачидзе Н.И, Хачидзе Т.И. СЕНСОР ДЛЯ ЭКСПРЕСС ИЗМЕРЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ РТУТИ. GEN, #1, 2000. Стр.40-41.
2. N.I. Khachidze, T.I. Khachidze. Development and investigation of microelectronic sensor devices for measurement mercury vapor concentration in air. PROCEEDINGS of the international scientific conference INFORMATION TECHNOLOGIES IN CONTROL, TBILISI-2007, vol. 2, p.p.370-372.

### Replacing a solid dielectric substrate with a polymer substrate in the construction of a mercury-sensitive sensor

Tengiz Khachidze<sup>1,2</sup>, Nikoloz Khachidze<sup>1</sup>,

LEPL Institute "Optica"<sup>1</sup>

Georgian Technical University<sup>2</sup>

Acknowledgment: This work was supported by Shota Rustaveli National Science Foundation of Georgia. Grant number FR-24-4324.

The paper presents studies related to the creation of a mercury-sensitive sensor. The possibility of increasing the time and temperature stability of the sensor developed by the authors through technological and constructive refinement is given. In particular, increasing the adhesion between the sensitive layer and the substrate by replacing the solid substrate with a polymer one. Technologically, the sensor layer is not deposited on the substrate, but on the contrary, a polyimide substrate is formed on the sensor layer. Technological processes were carried out and the resulting structures were investigated. According to the initial results, the adhesion strength of the mercury-sensitive gold thin layer to the polymer substrate increased by approximately one order of magnitude compared to the adhesion strength of the same layer to a solid dielectric layer. This gives us reason to assume that a sensor made with this design and technology will be stable and durable over time and against thermal loads.

**Keywords:** mercury, sensor, polymer, substrate.